

Värien näkemisen fysiikkaa

Linda Karlsson
LuK-tutkielma
Fysiikan tutkinto-ohjelma
Luonnontieteellinen tiedekunta
Oulun yliopisto
Kesäkuu 2020

Sisällysluettelo

Johdanto	3
1 Valo sähkömagneettisessa spektrissä	4
2 Sähkömagneettinen aalto	6
3 Valon ominaisuuksia	8
3.1 Heijastuminen ja taittuminen	8
3.2 Absorptio ja emissio	11
3.3 Aallonpituusjakauma	12
4 Värimuodostuksen teoriaa	13
4.1 Additiiviset eli primääriset päävärit	13
4.2 Subtraktiiviset eli sekundaariset päävärit	14
4.3 Pigmenttien toimintaperiaate	14
5 Värinäön toiminta	17
5.1 Valonlähteen ominaisuuksista	17
5.1.1 Spontaani emissio	17
5.1.2 Stimuloitu emissio	18
5.2 Valon valaiseman esineen väri	18
5.3 Silmä värin havaitsijana	19
5.4 Aivot värien tulkitsijana	23
6 Yhteenveto	25
7 Lähteet	26

Johdanto

Itseäni paljon kuvataidetta harrastaneena, ovat aina kiinnostaneet värit ja värienmuodostus. Aikoinani katsoessani tv:stä ohjelmaa nimeltä Brain Games (joka on amerikkalainen vuonna 2011 alkunsa saanut National Geographigin alkuperäissarja [9]) esitettiin ohjelmassa tilanne, jossa aurinko valaisee lehden, ja kysyttiin; minkä värinen lehti on? Normaalisti kysymykseen vastattaisiin lehden olevan vihreä, sillä ihminen näkee sen vihreän värisenä. Ohjelma esitti kuitenkin väitteen, että lehden voidaan sanoa olevan esimerkiksi punainen tai sininen, sillä lehti ns. sisältää todellisuudessa kaikkia muita värejä paitsi vihreää. Väite perusteltiin sillä, että lehti imee itseensä kaikkia muita värejä kuin vihreää ja heijastaa ainoastaan vihreää valoa. Itseäni on siis kiinnostanut kyseisen ohjelman jakson katsottuani, mitä esitettyyn tilanteeseen syvemmin sisältyy ja ennen kaikkea, miten fysiikan avulla voidaan ymmärtää värien näkemistä.

Tässä kandidaatin tutkielmassa syvennytään ihmisen värinäköön tutkimalla siihen liittyviä tekijöitä fysiikan näkökulmasta kirjallisuuskatsauksena. Väriaistimuksen ja ylipäättään näköaistimuksen olennainen osa on tietenkin ihmissilmä, johon tulevat valoärsykkeet tuottavat signaalin kohti aivoja, jossa ärsyke tulkitaan esimerkiksi väriksi. Väriaistimusta tutkiessa ei siis pysty sivuuttamaan täysin näitä kahta tärkeää elintä, jonka vuoksi tutkielmassani on esitettyä myös perusperiaatteiden avulla hieman silmän ja aivojen fysiologiaa sekä toimintaa väriaistimuksen syntymisen taustalla. Lisäksi värien muodostumisen ymmärtämiseksi perehdytään lyhyesti värinmuodostuksen teoriaan, kuten additiiviseen ja subtraktiiviseen värinmuodostukseen.

Värien näkeminen ei olisi mahdollista ilman valoa, ja tutkielman aiheen käsittely lähteekin liikkeelle valon fysikaalisen luonteen ja fysikaalisten ominaisuuksien ymmärtämisestä. Se mitä valolle tapahtuu ennen kuin se saavuttaa silmän, määrää suurimmaksi osin, minkä värisenä ihminen sen aistii. Tietenkin on olemassa värisokeuksia ja muita silmän tai aivojen yksilökohtaisia eroja, jotka vaikuttavat väriaistimukseen eri ihmisten kesken eli kukaan tuskin näkee tai ns. kokee värejä juuri samalla tavoin kuin sinä. Tässä tutkielmassa sivuutetaan kuitenkin ihmisen fysiologisten poikkeamien vaikutukset värihavaintoon ja pitäydytään valon fysikaalisissa ominaisuuksissa, jotka vaikuttavat sen väriin tai sävyyn.

1 Valo sähkömagneettisessa spektrissä

Sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituudet muodostavat sähkömagneettisen spektrin. Sähkömagneettinen spektri luokitellaan eri osiin säteilyn aallonpituuden mukaan ja suurimmasta aallonpituudesta pienimpään nämä osat ovat: radioaallot, mikroaallot, infrapunasäteily, näkyvä valo, ultraviolettisäteily, röntgensäteily ja gammasäteily. Aallonpituuden λ mittayksikkönä käytetään metriä tai sen johdannaisia. Sähkömagneettinen spektri voidaan luokitella myös sähkömagneettisen säteilyn taajuuden mukaan, sillä (tyhjiössä) aallonpituuden λ ja taajuuden f välillä on seuraava yhteys

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

missä $c = 299\,792\,458 \frac{m}{s}$ on valonnopeudelle määritetty vakio tyhjiössä.

Ihminen pystyy havaitsemaan sähkömagneettista säteilyä ainoastaan näkyvän valon aallonpituusalueella noin 400 - 700 nm, joka kattaa koko sähkömagneettisesta spektristä vain hyvin kapean kaistaleen. Puhuttaessa valosta tarkoitetaan sillä yleensä sähkömagneettisen spektrin näkyvän valon aluetta. Ihminen aistii näkyvällä alueella eri aallonpituudet eri väreinä Taulukon 1 mukaisesti. Koska ihminen pystyy havaitsemaan ainoastaan näkyvää valoa, kuullaan tämän vuoksi joskus puhuttavan niin kutsutuista näkymättömistä väreistä tai mahdottomista väreistä. Tällaisilla "*väreillä*" voidaan siis tarkoittaa sähkömagneettisen säteilyn niitä aallonpituuksia, joita ihmissilmä ei kykene näkemään. Esimerkiksi auringosta tuleva ultraviolettisäteily pystytään havaitsemaan näkemisen sijaan lämpönä.

Aallonpituusalue	Väri
400 - 440 nm	Violetti
440 - 480 nm	Sininen
480 - 560 nm	Vihreä
560 - 590 nm	Keltainen
590 - 630 nm	Oranssi
630 - 700 nm	Punainen

Taulukko 1. Näkyvän valon aallonpituudet. [4]

Valkoinen valo sisältää kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia, kuten esimerkiksi auringon lähettämä valo. Erilaisilla suotimilla voidaan tällaisesta valosta suodattaa esiin kapea aallonpituusalue muutaman na-

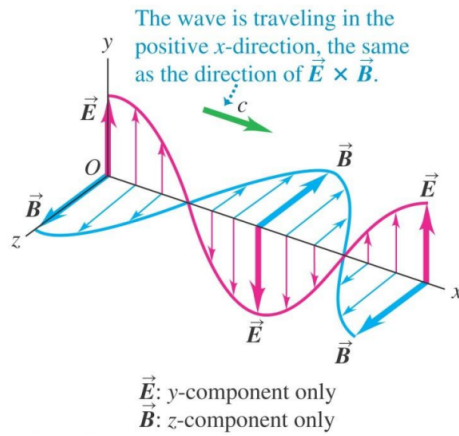
nometrin tarkkuudella. Saatavaa valoa voidaan aproksimatiivisesti kutsua monokromaattiseksi (yksiväriseksi) valoksi. Täydellisen monokromaattinen eli ainoastaan yhtä aallonpituutta sisältävä valo on ideaalisatio, jota ei todellisuudessa pystytä tuottamaan. Monokromaattisesta valosta puhuttaessa tarkoitetaan siis todellisuudessa hyvin pientä aallonpituusaluetta tietyn aallonpituuden ympärillä. Laserilla tuotettu valo on lähimpänä monokromaattista valoa kuin millään muulla tavalla tuotettu valo. [4]

2 Sähkömagneettinen aalto

Sähkömagneettinen säteily on energiaa, joka etenee niin kutsuttuina *sähkömagneettisina aaltoina*. Täten siis esimerkiksi hehkulampun hehkulan-
gan lähettämää näkyvää valoa voidaan mallintaa sähkömagneettisella aallolla.

Maxwellin yhtälöt osoittavat, että ajasta riippuva muuttuva magneetikenttä toimii sähkökentän lähteenä ja päinvastoin, muuttuva sähkökenttä synnyttää magneetikentän. Sähkökenttä \vec{E} ja magneetikenttä \vec{B} voivat siis ylläpitää toisiaan muodostaen sähkömagneettisen aallon, joka etenee avaruudessa.

Sähkömagneettinen aalto on poikittaista aaltoliikettä, joka ei vaadi väliainetta, kuten vettä tai ilmaa edetäkseen, toisin kuin mekaaniset aallot. Sähkömagneettinen aalto muodostuu kahdesta komponentista, sähkökentästä \vec{E} ja magneetikentästä \vec{B} . Molemmat komponentit ovat kohtisuorassa aallon etenemissuuntaan nähden. Lisäksi komponentit ovat kohtisuorassa myös toisiaan vastaan ja komponenttien ristitulovektori $\vec{E} \times \vec{B}$ osoittaa aallon etenemissuuntaan. Sähkömagneettisessa aallossa siis ikään kuin "aaltoilevat" sähkö- ja magneetikentät. [3,4]



Kuva 1: Positiivisen x-akselin suuntaan etenevä harmoninen sinimuotoinen sähkömagneettinen aalto. [4]

Kuvan 1 tilanteessa positiivisen x-akselin suuntaan etenevää harmonista sinimuotoista sähkömagneettista aaltoa voidaan kuvata yhtälöillä

$$\begin{cases} \vec{E}(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t) \hat{j}, \\ \vec{B}(x, t) = B_0 \sin(kx - \omega t) \hat{k} \end{cases}, \quad (1)$$

missä E_0 on värähtelevän sähkökentän amplitudi ja B_0 magneetikentän amplitudi. Sähkökenttä on valittu värähtelemään xy-tasossa ja magneetikenttä xz-tasossa. Vektori \hat{j} on y-akselin suuntainen yksikkövektori ja \hat{k} z-akselin suuntainen. Yhtälöissä k on ns. etenemisvakio eli ns. aaltoluku, ja ω aallon kulmataajuus. Nämä määritellään yhtälöillä

$$k\lambda = 2\pi \Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda},$$

ja

$$\omega = 2\pi f$$

Yhtälöstä (1) nähdään, että sähkömagneettisessa aallossa kentät ovat samassa vaiheessa, koska kenttien yhtälöissä sinin sisällä on sama argumentti. Kenttien suuruudet $E = |\vec{E}|$ ja $B = |\vec{B}|$ kytkeytyvät toisiinsa *tyhjiössä* yhtälöllä

$$E = cB, \quad (2)$$

missä c on valonnopeus tyhjiössä. Täten myös edellä esitetyssä aallossa yhtälössä (1) amplitudeille pätee $E_0 = cB_0$. [3]

Sähkömagneettinen aalto eristeessä

Edellä sähkömagneettista aaltoa on tarkasteltu ainoastaan tyhjiössä. Sähkömagneettinen aalto voi kuitenkin edetä aineessa; valo voi edetä esimerkiksi ilmassa, vedessä tai lasissa. Seuraavaksi keskitymme sähkömagneettisen aallon etenemiseen eristeessä.

Totesimme, että aallon kuvaamiseen riittää tarkastella vain esim. sähkökenttää, jonka suuruus ($E = |\vec{E}|$) harmonisen aallon tapauksessa on

$$E(x, t) = E_0 \sin(kx - \omega t),$$

missä aallon tyhjiönopeus saadaan laskemalla $c = \omega/k$. Eristeissä aalto on muodoltaan sama kuin tyhjiössä, joten yllä oleva tulos sähkökentälle pätee myös eristeessä. Aallon nopeus ν on kuitenkin muuttunut arvoon

$$\nu = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{n},$$

missä $c = \nu_0$ on valon nopeuden tyhjiöarvo ja n on väliaineen ns. taitekerroin. Valon nopeus tavallisissa eristeissä on aina pienempi kuin tyhjiönopeus, joten taitekerroin n on aina > 1 .

Johteessa taitekerroin n on kompleksinen ja aalto absorboituu materiaaliin sitä nopeammin mitä suurempi materiaalin johtavuus on. [3]

3 Valon ominaisuuksia

Valon luonne voidaan jakaa hiukkas- ja aaltoluonteeseen. Klassinen optiikka käsittelee valoa sähkömagneettisena aaltona, sillä aaltoluonteen avulla voidaan helposti selittää valon eteneminen ja käyttäytyminen väliaineissa ja rajapinnoilla. Hiukkasluonne taas on käyttökelpoinen tarkasteltaessa valon ja materiaalin vuorovaikutusta atomaarisella tasolla. Atomien ja molekyylien energioiden tapaan voidaan valonkin ajatella muodostuvan energiakvanteista, joita valon tapauksessa kutsutaan fotoneiksi. [3]

Ajateltaessa valoa sähkömagneettisena säteilynä klassisen optiikan mukaan, kulkee valon säde suoraa linjaa isotrooppisessa¹, homogeenisessä² optisessa väliaineessa, kuten tyhjiössä. Silmän toiminta ja näkö perustuvat siihen, että silmä pystyy näkemään esineitä, kunhan niistä lähtevä valo kulkeutuu suoraa linjaa kohti silmää. Valon kulkua tai luonnetta voidaan kuitenkin muuttaa optisilla materiaaleilla³ (kuten ilma, vesi tai lasi), jotka pystyvät absorboimaan, heijastamaan tai välittämään, tai tekemään samaan aikaan kaikkia kolmea näistä, tarkasteltavalle valolle. Seuraavissa osioissa perehdytään hieman tarkemmin näihin valon ominaisuuksiin. [1,3]

3.1 Heijastuminen ja taittuminen

Optisella alueella (infrapuna, näkyvä, ultravioletti) sähkömagneettinen kenttä värähtelee hyvin suurella taajuudella, mikä tarkoittaa että säteilyn aallonpituus on hyvin lyhyt. Tämän vuoksi valon etenemistä kuvaaville laeille saadaan siis hyvä approksimaatio, jos aallonpituuden annetaan mennä nollassa. Näin saatu approksimaatio osoittautuu niin tarkaksi, että poikkeamat siitä (erilaiset diffraktioilmiöt) tulevat esille vain erityisen tarkkoissa ja huolellisesti laadituissa koeolosuhteissa.

Tällaista optiikan aluetta, jossa aallonpituus jätetään huomiotta ($\lambda \rightarrow 0$), sanotaan *geometriseksi optiikaksi*, sillä kyseisessä approksimaatiossa optiikan lait voidaan muodostaa geometrian sääntöjen avulla. Geometrisessa optiikassa valo etenee äärettömän ohuita käyriä ns. **säteitä** pitkin. Jos säde ei ole äärettömän ohut (kuten esim. lasersäde), puhutaan sädekimpusta.

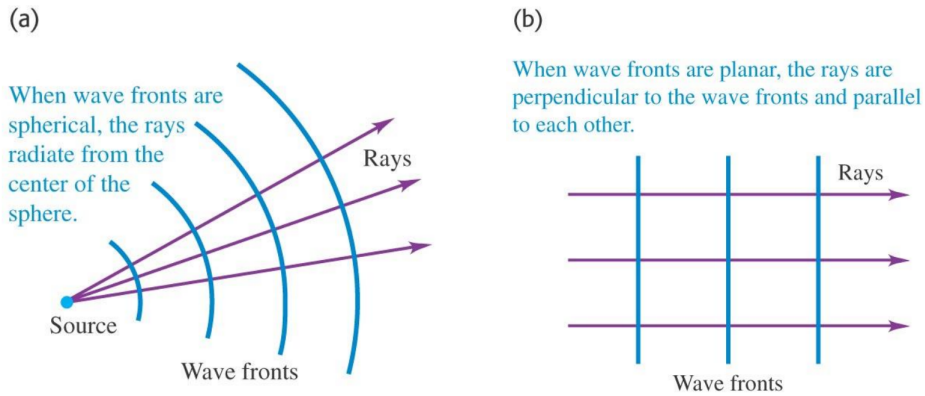
Säteiden lisäksi valon etenemistä kuvataan **aaltorintamilla**, jotka

¹Isotrooppisen aineen optiset ominaisuudet ovat samat kaikkiin suuntiin.

²Homogeenisessa aineessa optiset ominaisuudet ovat samat kaikkialla.

³Optisilla materiaaleilla yleisimmässä merkityksessä tarkoitetaan materiaaleja, joiden tehtävänä on muuttaa tai kontrolloida sähkömagneettista säteilyä sen optisella alueella (ultravioletti, näkyvä, infrapuna). [7]

edustavat 3-ulotteisessa aallossa vakiovaiheen pintoja. Säteet ovat homogeenisessa ja isotrooppisessa väliaineessa aina kohtisuorassa aaltorintamia vastaan. Valon etenemisen kuvaamista säteiden avulla on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Kuvassa a säteet ovat pallomaisia ja kuvassa b säteet kulkevat tasossa. Säteet on kuvattuna violetin värisenä ja aaltorintamat sinisellä. [4]

Valon säteen kohdatessa kahden aineen välisen tasaisen rajapinnan, kuten esimerkiksi veden ja ilman tai veden ja lasin rajapinnan, säde osittain heijastuu ja osittain taittuu jälkimmäiseen aineeseen.

1. Heijastuminen tapahtuu siten, että tuleva säde ja heijastunut säde ovat samassa tasossa ns. tulotasossa ja heijastuskulma θ_h on yhtä suuri kuin tulokulma θ_i

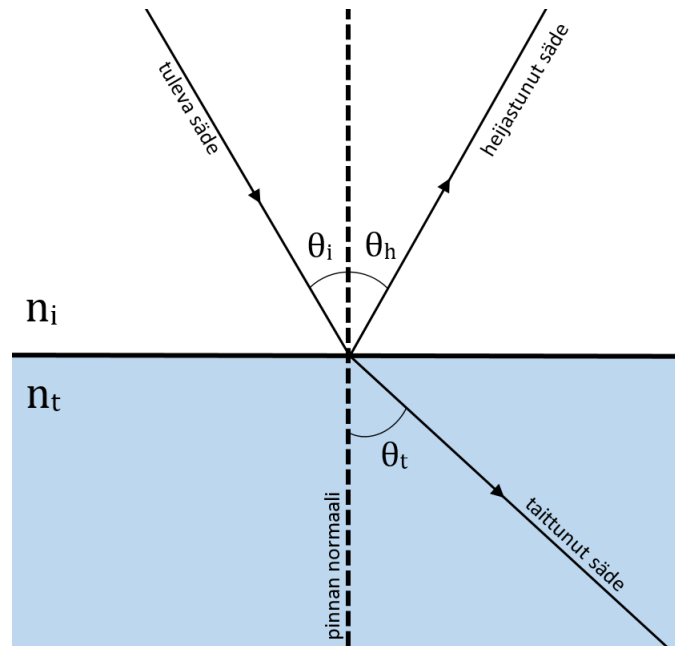
$$\theta_h = \theta_i. \quad (3)$$

2. Taittuminen kahden aineen rajapinnassa tapahtuu siten, että säde noudattaa Snellin lakia eli taittumislakia

$$\frac{\theta_i}{\theta_t} = \frac{n_t}{n_i} = \text{vakio}, \quad (4)$$

missä θ_t on taitekulma ja n_i sekä n_t ovat aineiden ns. taitekertoimia⁴. Myös taittunut säde jatkaa kulkuaan tulotasossa. Tuleva säde ja rajapinnan normaali määrittelevät tulotason, joka on siis kuvassa 3 paperin taso. [3]

⁴Materiaalin ns. optinen tiheys määräytyy taitekertoimen mukaan. Mitä suurempi taitekerroin sitä tiheämpi materiaali on optisesti. [3]



Kuva 3: Heijastuminen ja taittuminen kahden aineen rajapinnassa.

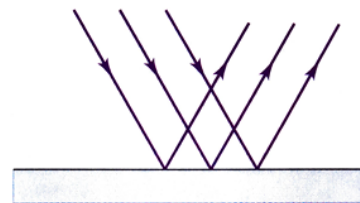
Diffuusi heijastus

Valon osuessa pintaan, joka on karkea (epätasainen) ei voida määrittää yhtä ainoaa heijastus- tai taitekulmaa. Tällöin puhutaan diffuusista heijastuksesta, ja sen seurauksena pintaan tuleva valo hajaantuu useaan eri suuntaan. Diffuusille heijastukselle pätevät yllä läpikäydyt heijastumisen ja taittumisen säännöt eli esimerkiksi säteen tulo- ja heijastuskulmat ovat yhtäsuuret pinnan normaalin suhteen. Jokaisen valon säteen heijastuessa ja taittuessa pinnan normaalin suhteen epätasaisesta pinnasta lähtevät säteet hajaantuvat eri suuntiin, toisin kuin peilimäisestä pinnasta (katso Kuva 4). [4]

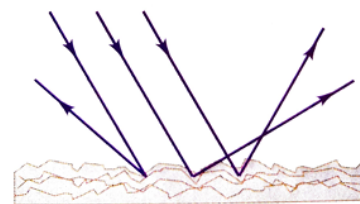
Kokonaisheijastus

Totesimme, että valo osuessaan kahden aineen rajapintaan sekä heijastuu että taittuu. On olemassa kuitenkin tilantei-

(a) Specular reflection



(b) Diffuse reflection

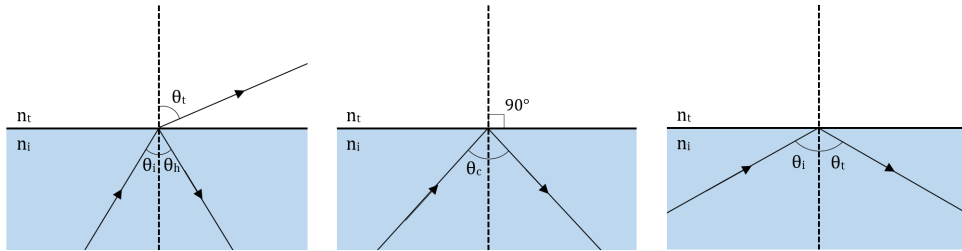


Kuva 4: Kuvassa a valo heijastuu peilimäisestä pinnasta ja kuvassa b karkeasta pinnasta. [4]

ta, joissa valo ei taitu toiseen väliaineeseen ollenkaan vaan heijastuu kokonaan. Puhutaan kokonaisheijastuksesta.

Valon kulkiessa optisesti tiheämmästä aineesta optisesti harvempaan aineeseen eli, kun $n_i > n_t$ (kuten esim. valon kulkiessa vedestä ilmaan), on taitekulma suurempi kuin tulokulma ($\theta_t > \theta_i$). Tällöin säde kääntyy normaalista poispäin.

Tulokulman θ_i kasvaessa saavutetaan tilanne, jossa taitekulma $\theta_t = 90^\circ$, kuten kuva 5 havainnollistaa.



Kuva 5: Valon kokonaisheijastus kahden aineen rajapinnassa.

Tällaisessa tilanteessa tulokulma $\theta_i = \theta_c$ on ns. kriittinen tulokulma, jolle pätee

$$\sin \theta_c = \frac{n_t}{n_i} \sin 90^\circ = \frac{n_t}{n_i}.$$

Jos tulokulma $\theta_i > \theta_c$, tapahtuu kokonaisheijastuminen. [3]

3.2 Absorptio ja emissio

Valon absorptiota ja emissioita ei pystytä selittämään valon aaltoluonteen avulla. Näitä ilmiöitä tarkasteltaessa käytetään avuksi valon hiukkasluonnetta, jonka mukaan sähkömagneettisen aallon energia on kvantittunut ts. se absorboituu ja emittoituu ikään kuin tietyn kokoisina energiapakkauksina, joita kutsutaan fotoneiksi.

Tämän lisäksi atomin sisäinen energia on myös kvantittunut; yksittäisen atomin energia ei voi saada mitä tahansa arvoja. Ainoastaan tietyt diskreetit arvot ovat mahdollisia ja atomin ns. tiloja näillä energioilla kutsutaan energiatiloiksi. Jokaisella atomilla on pienin mahdollinen energia, jolla se voi olla, ns. perustila. Kaikkia perustilaa suurempia energioita tiloja kutsutaan viritustiloiksi. Atomi voi siirtyä energiatilalta toiselle absorboimalla tai emittoimalla fotonin, jonka energia vastaa siirtymän energiatilojen energioiden erotusta; jos atomi on energiatilalla E_i ja se

siirtyä korkeammalle energiatilalle E_f se absorboi fotonin, jonka energia on

$$E_f - E_i = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5)$$

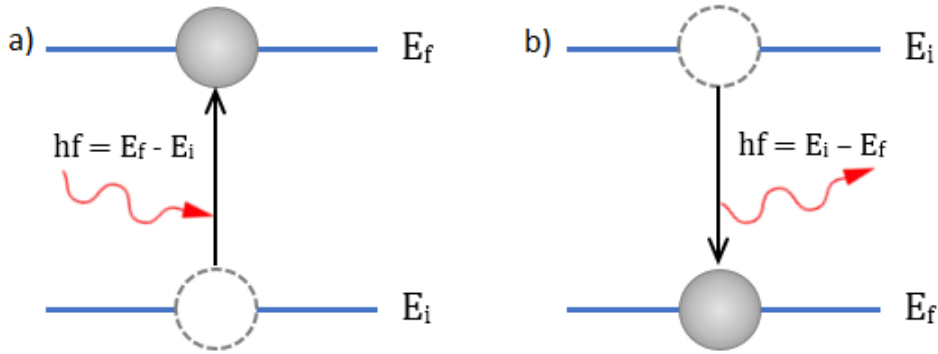
missä h on Planckin vakio, f fotonin energia ja λ fotonin aallonpituus. Tällöin atomi on virittynyt korkeammalle energiatilalle absorboimalla fotonin.

Atomin palatessa viritystilalta matala energisemmälle tilalle se emittoi fotonin, jonka energia jälleen vastaa energiatilojen erotusta. Tällöin emittoitun fotonin energia on

$$E_i - E_f = hf, \quad (6)$$

kun E_i on korkeamman energiatilan energia ja E_f matalamman. Kuva 6 havainnollistaa fotonin absorptiota ja emissiota.

Atomin stabiilein eli pysyvin tila on perustila ja virittynyt (yksittäinen) atomi pyrkii aina palaamaan perustilaansa, jonka vuoksi viritystilat ovat yleensä hyvin lyhytikäisiä. [4]



Kuva 6: Kuvassa a atomi virittyy korkeammalle tilalle absorpoimalla fotonin. Kuvassa b atomi emittoi fotonin palatessaan alemmalle energiatasolle.

3.3 Aallonpituusjakauma

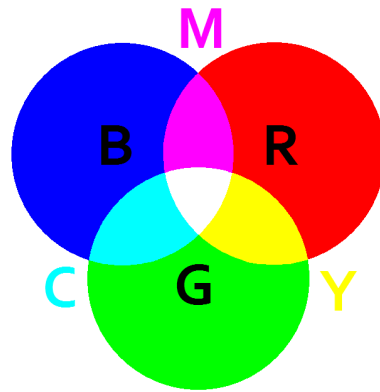
Valon sävyä ja väriä tutkittaessa on hyödyllistä määrittää valolle sen säteilyn voimakkuus aallonpituuden funktiona (engl. *Spectral power distribution*) [2]. Tässä tutkielmassa, puhuttaessa valon aallonpituusjakau-
masta, ei siis tarkoiteta pelkästään valon sisältämiä aallonpituuksia vaan tätä kyseistä valon säteilyn voimakkuutta aallonpituuden funktiona.

4 Värimuodostuksen teoriaa

Värien näkemisen toiminnan ymmärtämiseksi on hyvä ymmärtää myös hieman tarkemmin, mitä värit ovat, miten värejä ns. muodostetaan ja sitä myöten, mistä esine, kuten vihreä lehti saa värinsä. Pohjimmiltaan väreillä tarkoitetaan näkyvän valon eri aallonpituuksia. Seuraavaksi syvennymme lyhyesti värimuodostuksen teorioihin: perehdymme valovärien sekoittamisessa käytettäviin additiivisiin pääväriin, sekä vastavaan väriaineiden, kuten pigmenttien sekoittamiselle käytettävään subtraktiivisten päävärien teoriaan.

4.1 Additiiviset eli primääriset päävärit

Additiivisen värimuodostuksen päävärejä kutsutaan ns. primäärisiksi pääväreiksi ja ne ovat *valovärejä*, joita ei saada aikaan muiden valovärien sekoituksena. Additiivisia päävärejä voidaan kutsua siis ikään kuin *valon pääväreiksi*, joita ovat punainen (*red*), vihreä (*green*) ja sininen (*blue*). Lyhennettynä voidaan puhua myös RGB-väreistä (**R**ed, **G**reen, **B**lue). Nimi additiivinen väri johtuu siitä, että tällaisia värejä sekoittamalla valoisuus ikään kuin lisääntyy; kun esinettä valaistaan punaisilla, sinisillä ja vihreillä valoilla, ne tuovat lisää värejä esineen heijastamaan valoon. Kaikkia kolmea väriä yhdistämällä saadaan valkoista valoa, kuten kuva 7 havainnollistaa. Valkoinen valo siis todella on valoa, joka sisältää kaikkia valovärejä eli kaikkia näkyvän valon aallonpituuksia (katso kohta 1 *Valkoinen valo*). [5,8]



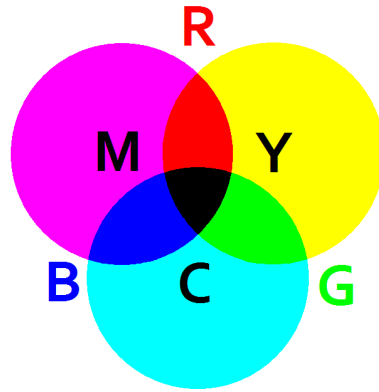
Kuva 7: Additiivinen värimuodostus.

Ihmisen värien näkemisen mekanismi perustuu juuri tähän additiiviseen värimuodostukseen. Aivomme tulkitsevat niin valoilla kuin muillakin tavoilla tehtyjä tai syntyneitä väriärsyksiä ainoastaan RGB-valoärsykkeiden keskinäisinä määräsuhteina. Tästä kuitenkin lisää myöhemmin kohdissa *Silmä värin havaittajana* (5.3) ja *Aivot värien tulkitsejana* (5.4). Näköjärjestelmämme toimintaperiaatetta ja sitä myöten additiivisten värienmuodostusta käytetään hyväksi esimerkiksi television, tietokoneen tai kännykän näyttöruuduilla, joiden toiminta perustuu RGB-väreihin. [8]

4.2 Subtraktiiviset eli sekundaariset päävärit

Väriaineiden sekoittamisessa eli substraktiivisessa, valoisuutta vähentävässä värinmuodostuksessa päävärejä ovat syaani (*cyan*), magenta (*magenta*) ja keltainen (*yellow*). Nämä päävärit ovat väriaineina sävyjä, joita ei saada aikaan muiden väriaineiden sekoituksena ja joita sekoitettaessa valoisuuden määrä ei lisäännä. Näitä päävärejä: syaania, magentaa ja keltaista, yhdistämällä saadaan punaista, sinistä ja vihreää, kuten nähdään kuvasta 8. Subtraktiivisia päävärejä kutsutaan myös sekundaarisiksi pääväreiksi juuri sen takia, että ne saadaan muodostettua primäärisistä pääväreistä (4.1). Substraktiivisiksi näitä päävärejä kutsutaan siksi, että jos kappaletta maalataan syaanilla, magentalla ja keltaisella maalilla, ne poistavat kappaleen heijastamasta valosta värejä ja sekoituksen tuloksena saadun värin valoisuus on lähtövärejään tummempi. Jos esimerkiksi sekoitetaan keskenään syaania ja keltaista maalia (ilman liuotin- ja sideaineita), nähdään vihreä värisävy, jolla on kyseisten aineiden valoisuuksien keskiarvo. Kaikkia näitä päävärejä yhdistettäessä poistetaan luonnollisesti kaikki väri, jolloin jäljelle jää mustaa. [5,8]

Valoisuutta vähentävää CMYK-värinmuodostusta käytetään mm. värivalokuviissa sekä kirjapainojen ja väritulostimien nelivärikuviissa. Näissä kuviissa neljäs "väri" on itse asiassa värisävytön musta pigmentti (K = Black). [8]

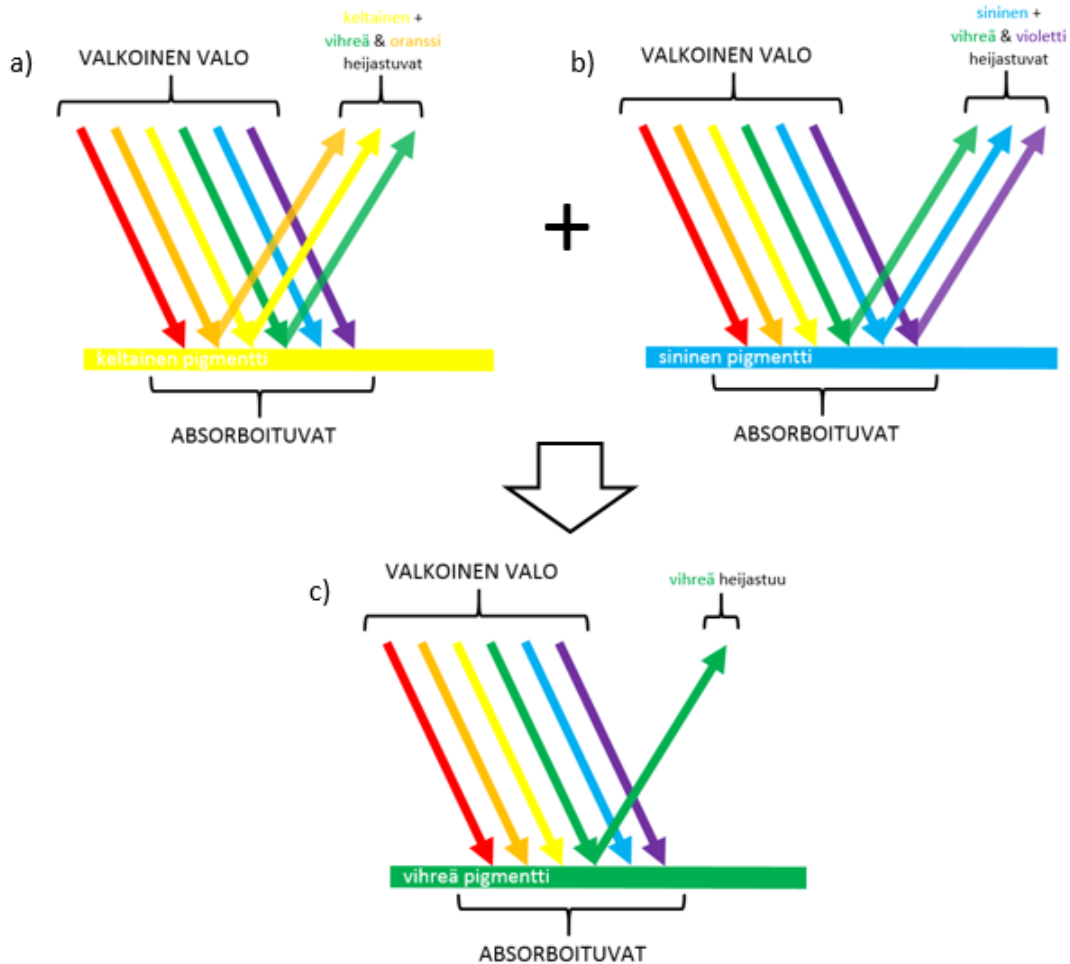


Kuva 8: Substraktiivinen värinmuodostus.

4.3 Pigmenttien toimintaperiaate

Pigmenttejä ja väriaineita on paljon erilaisia ja ne voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia. Pigmenttejä on käytännössä saatavilla jauhemaisina, ja ne yleensä sekoitetaan sideaineeseen, jolloin niistä saadaan maalia. Pigmentit absorpoivat valikoivasti valon eri aallonpituuksia; valkoisen valon osuessa pigmenttiin, osa aallonpituuksista heijastuu pigmentin pinnasta (katso *Heijastuminen ja taittuminen* 3.1) ja loput aallonpituudet absorboituvat siihen (katso *Absorptio ja emissio* 3.2). Pigmentin heijastamat aallonpituudet määrävät, minkä värisenä ihminen sen näkee. Pigmentit toimivat substraktiivisen väriteorian mukaan (katso *Substraktiiviset eli sekundääriset päävärit* 4.2) eli niiden voidaan sanoa vähentävän väriä,

niihin osuvasta valosta; pigmentti absorboi valon aallonpituuksia eli vähentää valoisuutta sitä valaisevasta valosta. [11]



Kuva 9: Pigmenttien toiminta.

Kuva 9 havainnollistaa pigmenttien toimintaperiaatetta; miten pigmentin väri määräytyy sen heijastaman ja absorboiman valon värin mukaan ja, miten eri väreisiä pigmenttejä sekoittamalla muodostuu ns. uusia värejä (sekoitettu väri poikkeaa lähtöväreistä). Kuvan 7a mukaan keltaista pigmenttiä valaistaessa valkoisella valolla, se heijastaa keltaista valoa (pigmentti heijastaa sen väristä valoa, miltä sen väri näyttää), mutta myös osittain oranssin ja vihreän valon aallonpituuksia. Heijastuvan keltaisen valon intensiteetti on kuitenkin muita heijastuneita aallonpituuksia suurempi, joten pigmentti nähdään keltaisena. Käytännössä mikään pigmentti ei ole puhdasta eli se ei sisällä pelkästään valon aallonpituuksia esim. keltaiselta alueelta, vaan kullakin pigmentillä on sille ominaisensa aallonpituusjakauma. Vastaavasti kuvassa ylhäällä oikealla sininen pig-

mentti heijastaa pääosassa sinistä valoa, mutta myös hieman valoa vihreän ja violetin aallonpituuksilla. Sekoittamalla keltaista ja sinistä pigmenttiä keskenään, heijastaa näiden tuloksena saatu pigmentti ainoastaan vihreää valoa. Vihreän pigmentin sisältämä keltainen pigmentti absorboi sinisen pigmentin sisältämän violetin, ja sininen pigmentti vastavasti keltaisen sisältämän oranssin. Jäljelle jää siis vain vihreää valoa, jolloin keltaista ja sinistä pigmenttiä sekoittamalla saadaan aikaan vihreää pigmenttiä. [12]

5 Värinäön toiminta

Väriaistimuksen syntyminen koostuu yleisesti neljästä eri asiasta

1. Valonlähteestä, joka toimii värin lähteenä.
2. Esineestä, jonka valonlähteen valo valaisee.
3. Silmästä, joka vastaanottaa esineen lähettämän valon.
4. Aivoista, joissa silmän valoistimuksen tuottamat ärsykkeet tulkitaan väriksi. [1]

Väriaistimuksen syntymiseen ei vaadita esinettä, sillä voimme katsoa tietenkin suoraan jotakin valonlähdettä, kuten tietyn väristä LEDiä ja havaita sen lähettämän valon värin. Kuitenkin tämän LEDin valaistessa esineen, siirrymme tulkitsemaan esineen väriä ja LEDi valaistuksen vaikutusta siihen.

5.1 Valonlähteen ominaisuuksista

Auringon lähettämän valkoisen valon lisäksi näkyvää valoa voidaan tuottaa keinotekoisesti atomin energiatilojen nopeilla muutoksilla; atomin siirtyessä suhteellisen korkeaenergiseltä tilalta matalampi energiseen perustilaan, tilojen välinen energia ero usein emittoituu fotonina eli valona (katso *Absorptio ja emissio* 3.2). Sarja tällaisia kontrolloituja nopeita siirtymiä tuottaa ikään kuin fotonisuihkun, jota siis voidaan kutsua valaistukseksi. Tätä periaatetta käytetään hyväksi esimerkiksi taskulampuissa, valoa emittoivissa diodeissa eli LEDeissä ja lasereissa. Keinotekoisia valoa voidaan tuottaa spontaanin emission tai stimuloidun emission avulla. [4]

5.1.1 Spontaani emissio

Spontaani emissio on prosessi, jossa korkeampaan energiatilaan viritetty atomi palaa spontaanisti perustilaansa emittoiden samalla fotonin, jonka energia vastaa energiatilojen erotusta yhtälön (6) mukaisesti. Spontaanissa emissioissa emittoituvan fotonin suunta ja vaihe ovat satunnaisia.

Spontaani emissio on yleisin valon tuotantoprosessi. Hehkulampun emittoima valo on esimerkki spontaanista emissiosta. Ohuen hehkulangan läpi kulkeva sähkövirta saa langan lämpötilan nousemaan, ja kuumetessaan lanka alkaa hehkua. Langan kuumetessa metalliatomien lämpöliike voimistuu, ja atomit virittyvät. Viritystila purkautuu spontaanisti synnyttäen fotonin. Hehkulanka emittoi fotoneita eri energioilla ja sitä myöten eri aallonpituuksilla. Tämän vuoksi hehkulampun lähettämän

valon aallonpituusjakauma koostuu monista eri aallonpituuksista ja valo ei ole yksiväristä. [4]

5.1.2 Stimuloitu emissio

Spontaanin emission lisäksi, viritetyssä tilassa oleva atomi voi palata perustilaansa vaihtoehtoisesti stimuloidulla emissiolla, jossa viritettyä atomia ns. stimuloidaan fotonilla, jonka taajuus on f . Tällöin atomi, palatessaan perustilaansa, emittoi toisen fotonin, jolla on sama taajuus f , vaihe ja suunta, kuin ensimmäisellä (stimuloivalla) fotonilla. Stimuloivan fotonin suunta, taajuus, vaihe tai polarisaatio eivät muutu prosessissa, joten tuloksena on kaksi fotonia, jotka ovat monokromaattisia; niillä on sama taajuus, ja koherentteja; ne ovat samassa vaiheessa, ja niiden kulkusuunta on samaan suuntaan. Syntyneet fotonit voivat edelleen stimuloida viritetyssä tilassa olevia atomeja, jolloin stimuloidulla emissiolla voidaan saada aikaan suuri määrä koherenttia valoa.

Useista eri syistä johtuen fotonien taajuudet (energiat) eivät ole täsmälleen samat, minkä vuoksi syntyvä valo ei ole täysin monokromaattista. Esimerkiksi laserin valo, joka tuotetaan stimuloidun emission periaatteella, on koherenttia ja hyvin lähellä monokromaattista valoa. Koska stimuloidun emission kautta tuotetut fotonit kulkevat samaan suuntaan, keskittyy laserin valon intensiteetti hyvin pienelle alueelle. Tämän vuoksi lasersäde on hyvin kapea. Hehkulampun valo taas jakaantuu lampusta jokaiseen suuntaan, sillä spontaanisti emittoitunut foton voi emittoitua mihin suuntaan tahansa. [4]

Valonlähteitä on paljon erilaisia ja pelkästään, jo niiden tuotantoprosessi osakseen määrittää, minkälainen niiden lähettämän valon aallonpituusjakauma on. Tämä aallonpituusjakauma vaikuttaa siihen, miltä esineen väri näyttää. Esimerkiksi pigmentit eivät näytä täysin saman värisiltä auringonvalossa ja UV-valossa, sillä eri valaistuksissa eri aallonpituudet jäävät esineen pigmenttien heijastuttaviksi tai absorboitaviksi. Tämän vuoksi pigmentin väriä esitettäessä on kerrottava laboratoriovalaistuksen väri, jossa mittaukset on tehty. Standardi valaistus tällaisille mittauksille on 6500 K (D65), joka vastaa auringon valon värilämpötilaa. [11]

5.2 Valon valaiseman esineen väri

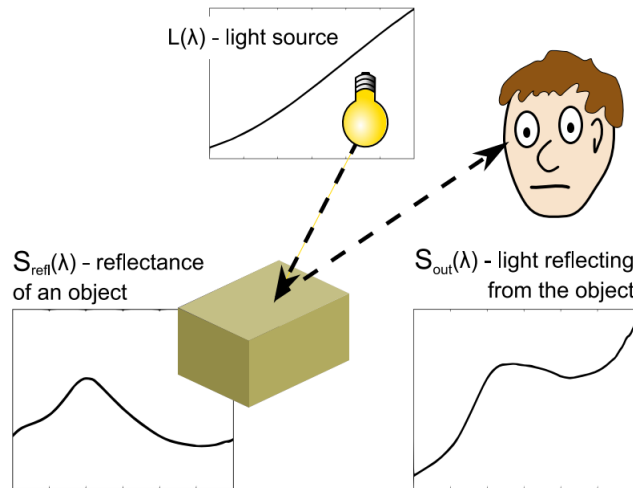
Esinettä valaisevan valonlähteen valon aallonpituusjakauman lisäksi, esineestä lähtevän tai heijastuvan valon väriin eli esineen väriin vaikuttaa myös esineen materiaali. Esineen sisältämät pigmentit ovat yksi esineen väriin vaikuttava tekijä. Lisäksi esineen väriin vaikuttaa esimerkiksi onko sen materiaali läpinäkyvä vai läpinäkyvää, tai onko esineen pinta

sileää vai karkeaa (katso *Diffuusi heijastus* 3.1). Yleisemmin esineestä lähtevälle valolle voidaan määrittää aallonpituusjakauma, josta saadaan selville esineen väri.

Kun tiedetään valonlähteen valon säteilyn voimakkuus aallonpituuden funktiona $L(\lambda)$ (katso *Aallonpituusjakauma* 3.3) ja tunnetaan esineen heijastavuus ja läpäisevyys ominaisuudet eri aallonpituuksilla, voidaan valon ja materiaalin välisen vuorovaikutuksen tuotteena syntyvän valon aallonpituusjakauma laskea funktioiden $L(\lambda)$ ja $S_{\text{refl/trans}}(\lambda)$ tulona

$$S_{\text{out}}(\lambda) = L(\lambda) \cdot S_{\text{refl/trans}}(\lambda),$$

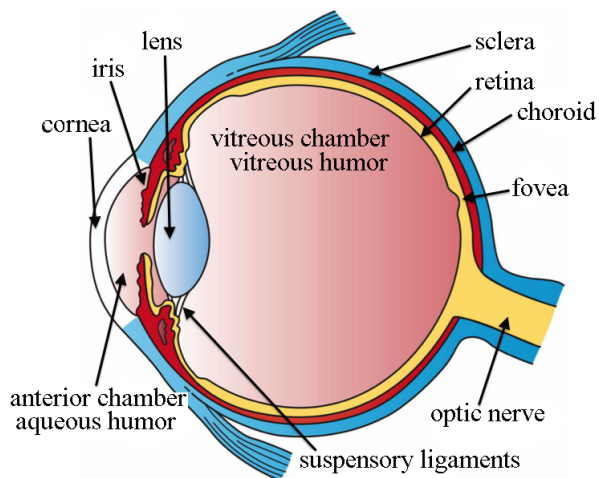
missä $S_{\text{refl}}(\lambda)$ on esineen heijastavuus (engl. *reflectance*) ominaisuuksista kertova *heijastavuusspektri* ja vastaavasti $S_{\text{trans}}(\lambda)$ on läpinäkyvän esineen läpäisevyys (engl. *transmittance*) ominaisuuksista kertova *läpäisevyyspektri*. $S_{\text{out}}(\lambda)$ on siis esineestä lähtevän valon aallonpituusjakauma. Värihavaintoon ja silmään saapuvaan aallonpituusjaukamaan vaikuttavia tekijöitä on havainnollistettu kuvassa 10 [2].



Kuva 10: Väri havaintoon vaikuttavia tekijöitä. [2]

5.3 Silmä värin havaitsijana

Ihmisen silmä on herkkä näkyvän valon aallonpituuksia vastaaville energioille, silmän voidaan siis sanoa olevan valon energian fyysinen reseptori [1]. Silmän rakennetta havainnollistetaan kuvalla 11.

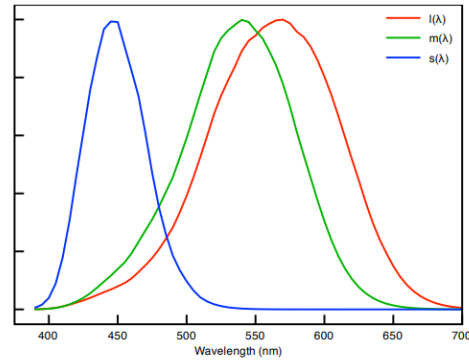


Kuva 11: Silmän rakenne. [10]

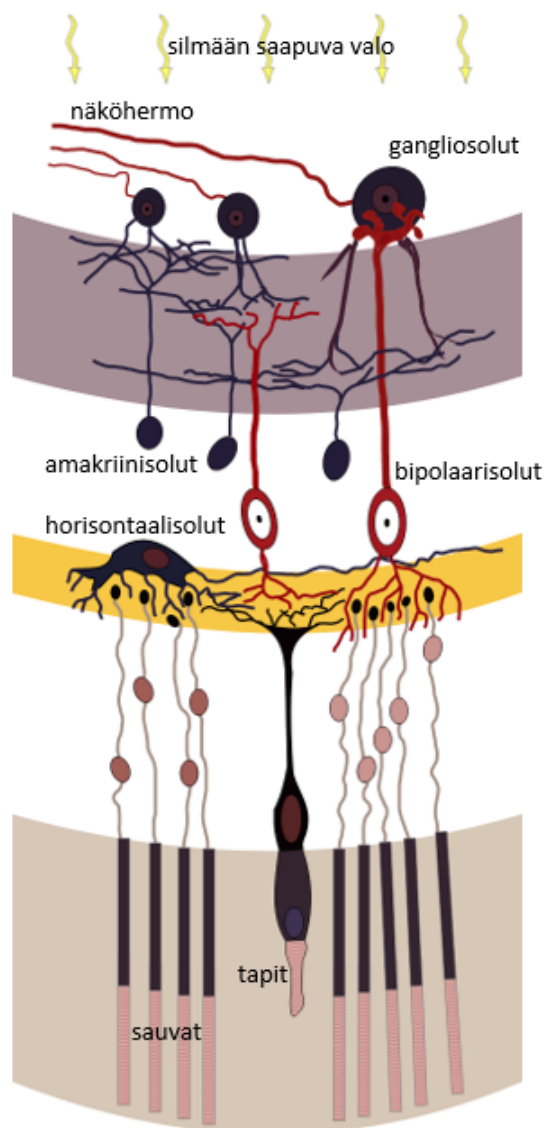
Valon saapuessa silmään se kulkee silmän takaosassa sijaitsevalle verkkokalvolle (retina), joka on ohut, hauras ja läpinäkyvä hermokudoskerros osana keskushermostoa. Retinassa on kahden tyyppisiä valolle herkkiä soluja: tappi ja sauvasoluja (ns. fotoreseptorit). Sauvasolut ovat aktiivisia hämärässä valaistuksessa, kun taas tappisolut toimivat paremmin kirkkaassa valaistuksessa. Verkkokalvolle saapuva valo ärsyttää sauva- ja tappisoluja, joissa kummassakin on valoa absorboivaa ns. *näköpigmenttiä*. Fotonit muuttavat näköpigmenttimolekyylien kolmidimensionaalista konfiguraatiota eli fotonin absorpoituminen näköpigmenttiin saa aikaan kemiallisen rakenteen muutoksen pigmenttimolekyyleissä, mikä johtaa lopulta aktiopotentiaalin syntymiseen sauva- tai tappisolussa eli ts. signaali valon aistimisesta lähtee liikkeelle silmästä kohti aivoja. [6]

Tappisolut vastaavat enimmäkseen värien näkemisestä, minkä vuoksi esimerkiksi emme näe värejä yhtä hyvin hämärässä kuin kirkkaassa valaistuksessa, sillä hämärässä tappisoluja aktiivisemmin toimivat sauvasolut eivät havaitse värejä [2]. Tappisoluja on kolmea eri tyyppiä sisältäen kolmea eri pigmenttiä, joista jokainen on herkkä tietyn taajuiselle valolle (katso *Pigmenttien toimintaperiaate* 4.3). Tappisoluja on tapana kutsua punaisiksi, vihreiksi ja sinisiksi tapeiksi sen takia, että nämä ovat valon päävärit (4.1) ja ihmisen ajatellaan aistivan niitä. Kuvan 12 mukaan tappien aistimien spektrien huippukohdat eivät kuitenkaan edes ole punaisessa, vihreässä ja sinisessä, ja lisäksi kukin tapeista myös aistii värejä laajalla aallonpituusalueella. Tämän vuoksi suositellaan puhuttavan lyhyen (engl. *Short*), keskipitkän (*Middle*) ja pitkän (*Long*) aallonpituusalueen tapeista (englanniksi lyhyemmin *S*, *M* ja *L* tyyppin tapeista) [5, 2].

Tappi- ja sauvosolujen lisäksi retinassa on lukuisia muun tyyppisiä soluja, jotka välittävät signaalit fotoreseptoreilta näköhermolle ja ulommalle polvitumakkeelle (engl. *lateral geniculate nucleus*, LGN). Retinan eri rakenteet näkyvät kuvassa 13. Kuvan mukaisesti valon saapuessa retinaan, se kulkee läpinäkyvän hermosolukerroksen läpi ja valaisee fotoreseptorisoluja, jotka reagoivat valoenergiaan. Sauvat ja tapit ovat yhteydessä bipolaari- ja horisontaalisoluihin, joille fotoreseptorisolut välittävät signaalin havaitusta valosta. Bipolaarisolut ovat yhteisissä myös amakriinisolujen kanssa, jotka lähettävät signaalit horisontaalisessa tasossa bipolaari- ja gangliosolujen välillä. Gangliosoluista hermoradat kuljettavat signaalit näköhermoon (*optic nerve*), jota pitkin signaalin kulku jatkuu aivoille. Retina sisältää yli sata miljoonaa fotoreseptorisolua, mutta ainoastaan miljoona gangliosolua, jotka välittävät informaation aivoille. Tämä on yksi selkeä viite siitä, että visuaalisia signaaleja prosessoidaan ainakin osittain jo retinassa. [2]



Kuva 12: Suhteelliset tappisolujen herkkyysalueet. [2]

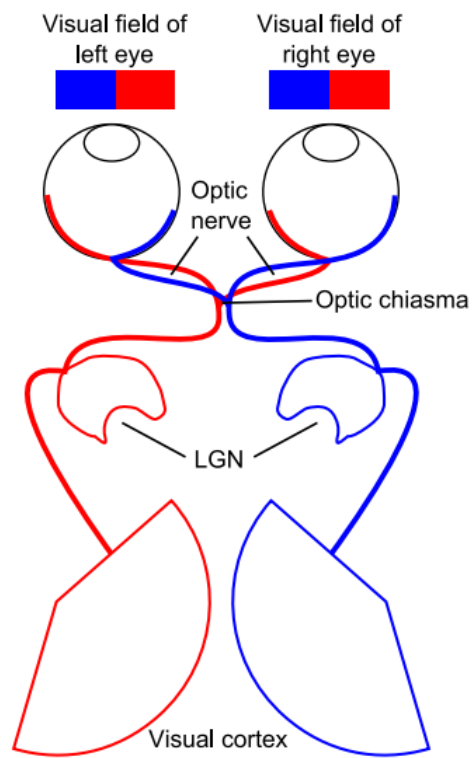


Kuva 13: Retinan rakenne. [13]

5.4 Aivot värien tulkitsijana

Retinan ganliosoluista lähtevät signaalit jatkavat kulkuaan näköhermoja pitkin kohti aivoja. Kuva 14 havainnollistaa signaalien kulkureitettä silmästä aivoihin. Kummastakin silmästä lähteneet signaalit risteävät optisessa kiasmassa (*optic chiasm*) noin puolessa välissä reittiään siten, että vasemmasta silmästä peräisin oleva informaatio kulkeutuu oikeaan aivonpuoliskoon, ja päinvastoin. Kiasman jälkeen noin 80 prosenttia näköhermoista liittyy talamuksessa sijaitsevaan ulompaan polvitumakkeeseen. Kummallakin aivopuoliskolla on yksi ulompi polvitumake ja kumpikin polvitumake vastaanottaa informaatiota kummastakin silmästä. Tämän informaation lisäksi polvitumake vastaanottaa signaaleja myös aivorungolta (*brain stem*) ja näköaivokuorelta (*visual cortex*). Näiden muiden signaalien roolista ei ole tarkkaa ymmärrystä, mutta tämän rakenteen monimutkaisuus osoittaa, että monet eri tekijät voivat vaikuttaa informaatioon, joka polvitumakkeelle on lähetetty. On esitetty, ettei polvitumakkeen pääasiallinen tehtävä olisi vaikuttaa neuronien reaktioherkkyyteen vaan, että polvitumake säätelisi retinalta tulevaa neuraalista informaatiota näköaivokuorelle. Tämä säätely voidaan nähdä, kun tutkitaan polvitumakkeeseen saapuvia ja sieltä lähteiviä signaaleja: jokaisesta 10:tä retinasta polvitumakkeeseen saapuvaa signaalia kohden, jatkaa tumakkeesta matkaa vain noin 4 signaalia näköaivokuorelle.

Ulompi polvitumake on jakautunut kuuteen kerrokseen, joista kahden alinta kutsutaan magno-solujen (*magnocellular cells*) ja neljää ylintä parvo-solujen (*parvocellular cells*) kerroksiksi. Parvo- ja magno-solujen kerroksien tarkemmat eroavaisuudet ovat edelleen tutkimuksen kohteena. Teoriana kuitenkin on, että suurin osa kaikesta valaistusta koskevasta informaatiosta kulkisi pitkin magno-solujen kerroksia, kun taas parvo-solujen kerrokset vastaisivat signaaleista, jotka johtavat väriaistimukseen. [2]



Kuva 14: Visuaalisten signaalien kulkureitit aivoissa. [2]

6 Yhteenveto

Väriaistimus saa alkunsa valonlähteestä, jonka lähettämälle valolle voidaan määrittää aallonpituusjakauma, joka kertoo säteilyn voimakkuuden aallonpituuden funktiona. Tätä aallonpituusjakaumaa voidaan fyziikan kannalta pitää tietona siitä, minkä värinen valonlähteen valo on. Värin näkeminen vaatii kuitenkin, että valonlähteen valo kulkeutuu silmiimme. Silmään tuleessaan valo kulkeutuu silmän takaosassa sijaitsevaan retinaan, jossa väriaistimuksen kannalta tärkeät, tappisolut reagoivat valoärsykkeeseen. Tappisolujen sisältämät pigmentit absorboivat valoa eri aallonpituuksilla; tappisoluja on kolmea eri tyyppiä, jotka ovat herkkiä siniselle, vihreälle tai punaiselle valolle. Tappisolut toimivat siis additiivisen värinmuodostuksen mukaan, missä pääväreinä ovat nämä kolme: sininen, vihreä ja punainen. Informaatio tappisolujen havaitsemasta valosta kulkeutuu hermoratoja pitkin aivoille, jossa tehdään lopullinen prosessointi valoärsykkeelle ja sen tuloksena syntyy väriaistimus.

Silmään tuleva valo voi olla siis peräisin suoraan jostakin valonlähteestä tai valonlähteen valaisema valo voi osua esineeseen, jonka pinnasta heijastuva valo voi edelleen kulkeutua silmään. Tällöin siis aistitaan esineen väri, joka määräytyy valonlähteen aallonpituusjakauman ja esineen aallonpituusjakauman mukaan. Esineen pinnan materiaali vaikuttaa siihen, miten siihen osuva valo muuttuu; esineen pinnassa voi olla pigmenttejä, joilla on tietty väri tai esineen pinta voi olla läpinäkyvä tai vaikka karhea. Periaate väriaistimuksen osalta on sama esineen tilanteessakin; silmä havaitsee esineestä lähtevän valon ja sen aallonpituusjakaumasta riippuu, minkä värisenä esine nähdään.

Johdannossa esittämäni National Geographicin tv-sarjan nimeltä Brain Games, väittämä tilanne siitä, että auringonvalossa olevan lehden voitaisiin sanoa olevan muun kuin vihreän värinen, ei siis ole ainakaan täysin väärä. Lehti tosiaan absorboi itseensä kaikkia muita aallonpituuksia kuin vihreää, jolloin kaikki muut värit ns. imeytyvät siihen. Värin määrittämisen mukaan, esine on kuitenkin sen värinen miltä se näyttää. Vihreän lehden siis heijastaessa vihreää valoa, sanotaan sen olevan vihreä.

Väriaistimukseen ja -näköön liittyy muitakin fysikaalisia tekijöitä kuin tässä tutkielmassani läpikäydyt ilmiöt. Esimerkiksi valon polarisaatio- tai diffraktioilmiöillä saattaa olla vaikutus valon väriin sen kohdatessa esineen, jolla on tällaisia optisia ominaisuuksia. Pohjimmiltaan värin näkeminen fysikaalisessa mielessä perustuu kuitenkin valoon, sen sisältämiin aallonpituuksiin ja niiden välisiin voimakkuuseroihin, jotka yhdessä määrittävät valon värin. Myös silmän tai aivojen fysiologiset ominaisuudet vaikuttavat väriaistimukseen eli siihen, minkä värisenä ihminen aistii valon. Todellisuudessa siis ihminen saattaa nähdä valon eri värisenä kuin mitä

sen aallonpituusjakauma on.

7 Lähteet

- [1] Abdul Al-Azzawi, Light and optics: principles and practices, Boca Raton (Flo.): CRC Press cop., 2007.
- [2] Tuija Jetsu, Modeling color vision, University of Eastern Finland, 2010.
- [3] Seppo Alanko, Aaltoliike ja optiikka 766329A, saatavana: <https://docplayer.fi/25743618-766329a-aaltoliike-ja-optiikka.html> (2015), luettu: 28.12.2019.
- [4] H. D. Young, R. A. Freedman, University Physics, Pearson Addison-Wesley cop. 12th ed., 2008.
- [5] Matti Eskelinen, Värien teoria ja värimallit, saatavana: <http://users.jyu.fi/~tro/gtksem02/prujut/matti/varimallit.pdf> (2002), luettu: 9.12.2019.
- [6] Tero Kivelä, Silmän rakenne ja toiminta. teoksessa K. M. Saari (toim) Silmätautioppi, Helsinki: Kandidaattikustannus Oy, 5. uudistettu painos (2001).
- [7] V. Sudarsan, Functional Materials: Preparation, Processing and Applications, Elsevier, saatavana: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/optical-material> (2012), luettu: 17.2.2020.
- [8] Martti Huttunen, Värit pintaa syvemmältä, Books on Demand, Helsinki, 2013.
- [9] IMDb, Brain Games, saatavilla: [https://en.wikipedia.org/wiki/Brain_Games_\(2011_TV_series\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Brain_Games_(2011_TV_series)), luettu: 13.4.2020.
- [10] Kuvan tekijä: Holly Fischer, [Three Main Layers of the Eye](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en), CC BY: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- [11] Helmenstine Anne Marie, Ph.D., Pigment Definition and Chemistry, ThoughtCo, saatavana: <https://thoughtco.com/pigment-definition-4141440> (Feb. 11, 2020), luettu: 23.6.2020.

[12] Tutorvista, Mixing of Pigments, katsottavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=OQkaVB3wWAQ> (2013), katsottu: 23.6.2020.

[13] Kuvan tekijä: Ramón y Cajal, [Retine bended](#), CC BY: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.